

# ЗАВИСИМОСТЬ ЭФФЕКТИВНОСТИ ПОСТРОЕНИЯ И ФУНКЦИОНИРОВАНИЯ БСС ОТ ТОЧНОСТИ ПОЗИЦИОНИРОВАНИЯ УЗЛОВ

Э. Ф. Хундонугбо<sup>1</sup>, И. В. Гришин<sup>1\*</sup>, А. И. Парамонов<sup>1</sup>

<sup>1</sup> СПбГУТ, Санкт-Петербург, 193232, Российская Федерация

\* Адрес для переписки: [i.v.grischin@gmail.com](mailto:i.v.grischin@gmail.com)

## Аннотация

Возможности современной микроэлектроники и беспроводных сетевых технологий открывают перспективы для создания разнообразных сетевых комплексов с широкой областью применения, среди которых следует особенно отметить беспроводные сенсорные сети. Принципиальная возможность определения местоположения объектов сенсорной сети в пространстве (позиционирование сенсоров) делает эти системы привлекательными за счет дополнительной информационной составляющей, которая вкупе с основным параметром или комплексом параметров мониторинга, может дать исчерпывающую картину работы системы, поэтому повышение точности позиционирования является актуальной проблемой на сегодняшний день. **Предмет исследования.** В статье исследуется влияние точности позиционирования сенсорных узлов на эффективность построения и функционирования беспроводной сенсорной сети. **Метод.** В качестве метода исследования был выбран вычислительный эксперимент. **Основные результаты.** Получены зависимости эффективности маршрутизации и затрат энергии от величины относительной ошибки позиционирования. Определена допустимая относительная величина ошибки позиционирования, обеспечивающая требуемые показатели эффективности функционирования сенсорной сети. **Практическая значимость.** Произведенный анализ позволит повысить эффективность управления беспроводной сенсорной сетью и рациональное использование ее ресурсов.

## Ключевые слова

эффективность, сенсорные узлы, позиционирование, маршрутизация.

## Информация о статье

УДК 004.725.5

Язык статьи – русский.

Поступила в редакцию 21.08.18, принята к печати 03.09.18.

**Ссылка для цитирования:** Хундонугбо Э. Ф., Гришин И. В., Парамонов А. И. Зависимость эффективности построения и функционирования БСС от точности позиционирования узлов // Информационные технологии и телекоммуникации. 2018. Том 6. № 3. С. 106–122.

# DEPENDENCE OF EFFICIENCY OF BUILDING AND FUNCTIONING OF THE WSN ON THE ACCURACY OF POSITIONING KNOTS

E. F. Houndonougbo<sup>1</sup>, I. Grishin<sup>1\*</sup>, A. Paramonov<sup>1</sup>

<sup>1</sup> SPbSUT, St. Petersburg, 193232, Russian Federation

\* Corresponding author: i.v.grischin@gmail.com

**Abstract**—The capabilities of modern microelectronics and wireless network technologies open up prospects for creating a variety of network systems with a wide range of applications, among which wireless sensor networks are particularly noteworthy. The principal possibility of determining the location of sensor network objects in space (sensor positioning) makes these systems attractive due to the additional information component, which, together with the main parameter or set of monitoring parameters, can provide a comprehensive picture of the system's operation, therefore improving the positioning accuracy is an actual problem today. **Research subject.** The article examines the influence of the positioning accuracy of sensor nodes on the efficiency of building and functioning of a wireless sensor network. **Method.** The computational experiment was chosen as the research method. **Core results.** The dependences of the efficiency of routing and energy costs on the value of the relative positioning error are obtained. The relative value of the positioning error is determined, which provides the required performance indicators of the sensor network. **Practical relevance.** The analysis will improve the management efficiency of the wireless sensor network and the rational use of its resources.

**Keywords**—efficiency, sensor nodes, positioning, routing.

## Article info

Article in Russian.

Received 21.08.18, accepted 03.09.18.

**For citation:** Houndonougbo E. F., Grishin I., Paramonov A.: Dependence of Efficiency of Building and Functioning of the WSN on the Accuracy of Positioning Knots // Telecom IT. 2018. Vol. 6. Iss. 3. pp. 106–122 (in Russian).

## Введение

Понятие эффективности чаще всего связывают с расходом некоторого количества ресурсов для решения определенной задачи. В этом смысле, повышение эффективности достигается методами, которые позволяют уменьшить затраты ресурсов для решения определенной задачи. В контексте рассмотрения беспроводных сенсорных сетей (БСС) понятие эффективности может быть отнесено как к задачам построения сети, так и к задачам ее эксплуатации.

В частности, рассмотрим задачи, связанные с выбором структурных параметров сети и задачи маршрутизации трафика [1, 2]. К структурным параметрам можно отнести такие параметры как: характеристики зоны обслуживания, количество узлов сети, характеристики зоны связи узла. Выбор значений структурных параметров производится как на этапе построения, так и при эксплуатации (при расширении или восстановлении) сети исходя из ее целевого назначения и тре-

бований к качеству функционирования. Если выбор структурных параметров производится решением некоторой задачи оптимизации (например, выбор оптимального маршрута), то следует ожидать, что ошибки в решении этой задачи могут привести к тому, что оно будет отличаться от оптимального. Это характерно как для задач проектирования, так и задач эксплуатации и управления сетью, например, задач маршрутизации трафика. Если оптимальное решение считать наиболее эффективным, то степень отличия решения от оптимального будет характеризовать эффективность самого решения.

Далее проведем анализ влияния ошибки позиционирования узлов БСС на эффективность решений, в частности задач маршрутизации трафика.

Построение и функционирование БСС связано с анализом позиций узлов сети, характеристик зон связи узлов сети, выбираемых протоколов маршрутизации и управления сетью [3, 4, 5]. Во многих прикладных задачах для организации сети, а также для обеспечения маршрутизации трафика в БСС применяются методы и протоколы, предполагающие наличие информации о позициях узлов сети. Эта информация используется как в задачах построения (развертывания) сети, так и задачах эксплуатации (маршрутизации трафика, восстановления или модификации структуры) сети. Когда процессы поддержания функционирования сети предполагают наличие информации о позициях (координатах) узлов, то вполне ожидаемо, что результаты выполнения этих процессов зависят от достоверности этой информации. Будем полагать, что достоверность информации о местоположении узлов БСС определяется точностью (ошибкой) позиционирования, которую обеспечивают соответствующие методы [6, 7, 8, 9, 10, 11].

Далее рассмотрим влияние ошибки позиционирования узлов БСС на процессы маршрутизации трафика, а также ее влияние на энергопотребление, что является непосредственным следствием «ошибок» процесса маршрутизации. Здесь под словом «ошибка» понимается выбор маршрута отличного от оптимального, что является следствием ошибок позиционирования.

Для сравнительного анализа введем показатели эффективности процесса маршрутизации, под которой будем понимать степень отличия реального процесса от идеального случая (от случая с абсолютно точными исходными данными).

Для проведения данных исследований разработана имитационная модель, позволяющая исследовать влияние ошибок позиционирования на основные показатели БСС.

## **1 Моделирование и анализ задач маршрутизации с учетом ошибок позиционирования**

Для оценки влияния точности (ошибки) позиционирования на эффективность маршрутизации, разработана имитационная модель сети, реализующая поиск кратчайших маршрутов в БСС, основанный на минимизации длины маршрута.

Модель имеет следующие характеристики: узлы БСС размещаются в области, представляющей собой квадрат  $200 \times 200$  м (параметры  $w$  и  $h$ ). Сеть содержит  $n = 100$  узлов, которые размещены случайным образом в области обслуживания. Для этого генерируются случайные числа в диапазоне от 0 до  $w$  и от 0 до  $h$ , имитирующие координаты  $x$  и  $y$ , соответственно. При генерации случайных чисел

используется генератор случайных чисел с равномерным распределением вероятности.

Модель узла связи описывается кругом с радиусом связи узла  $R$ . Данное упрощение допустимо во многих практических задачах организации БСС. В данном случае величина  $R = 50$  м, что характерно для многих технологий построения БСС. Для имитации процесса работы протокола маршрутизации в имитационной модели осуществляется поиск кратчайших маршрутов [12], при этом вычисляется средняя длина найденных кратчайших маршрутов. В модели выполняются два этапа: первый – поиск кратчайших маршрутов, которые рассматриваются как истинные кратчайшие маршруты (величина ошибки определения координат в данном случае равна нулю), второй – поиск кратчайших маршрутов для случая, когда местоположения узлов получены с ошибками. На втором этапе производится имитация ошибок позиционирования, которая производится путем искажения исходных позиций узлов на случайную величину (величину ошибки). Для этого генерируются случайные значения ошибки, имеющие нормальное распределение со средним значением 0 и заданной величиной среднеквадратического отклонения. Алгоритм функционирования имитационной модели приведен на рис. 1.

На рис. 2 приведен пример имитационного моделирования маршрутизации. На рис. 2а показан исходный (кратчайший) маршрут между двумя случайными вершинами, на рисунке 2б – маршрут, выбранный с учетом ошибок позиционирования узлов сети при заданном среднеквадратичном отклонении (СКО).

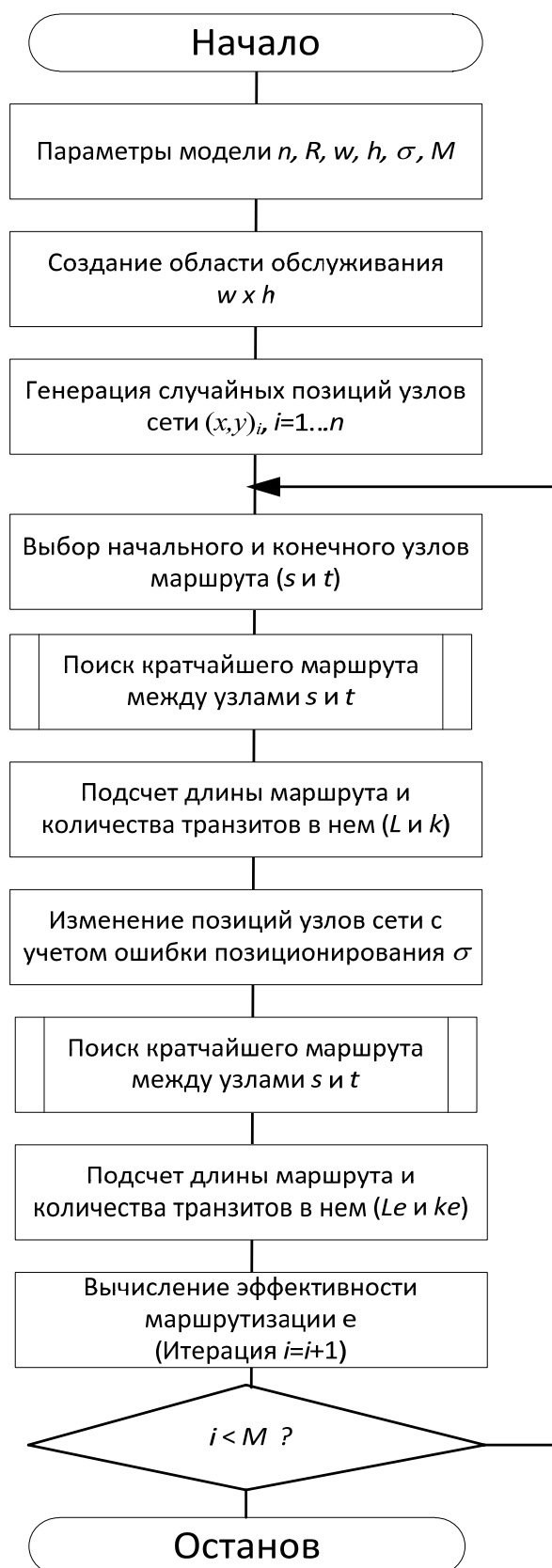


Рис. 1. Алгоритм функционирования имитационной модели

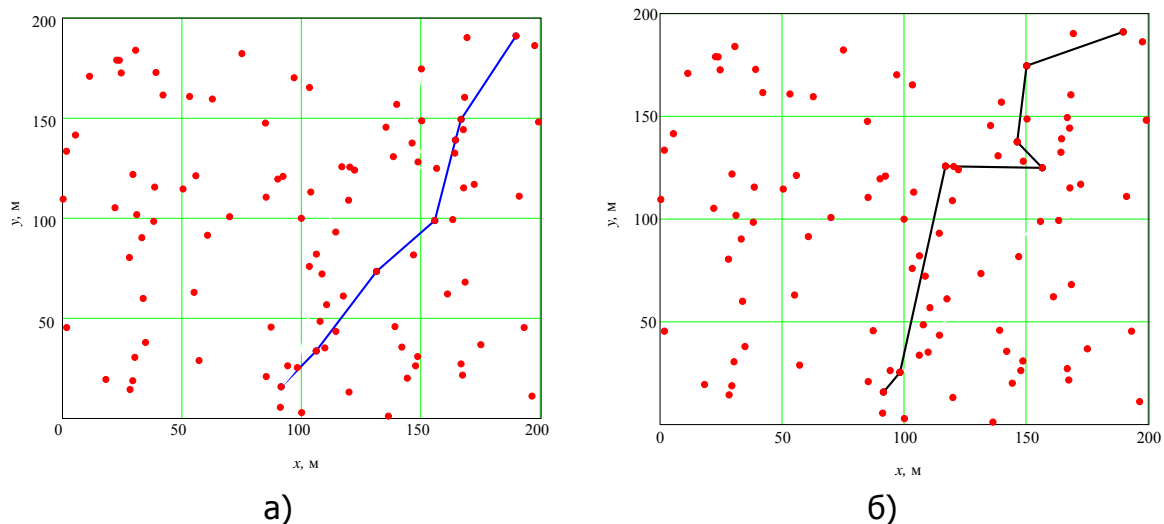


Рис. 2. Пример результатов имитационного моделирования при СКО ошибки позиционирования равной 20 м (*а* – кратчайший маршрут, *б* – выбранный маршрут)

Как видно из приведенных рисунков, выбираемый маршрут заметно отличается от «истинного» кратчайшего маршрута. Кратчайший и выбираемый маршруты могут отличаться не только длиной, но и количеством транзитных участков (рис. 3).

Приведенный на рис. 3 пример показывает случай, когда число транзитных узлов в выбираемом маршруте больше, чем в кратчайшем маршруте.

Следует отметить, что ошибка определения координат при оценке расстояний между двумя узлами может привести как к занижению, так и завышению оцениваемой величины, однако, очевидно, что ошибка при выборе кратчайшего маршрута может привести только к выбору маршрута большей длины, т. к. кратчайший маршрут, по определению, является единственным (или одним из нескольких маршрутов равной длины).

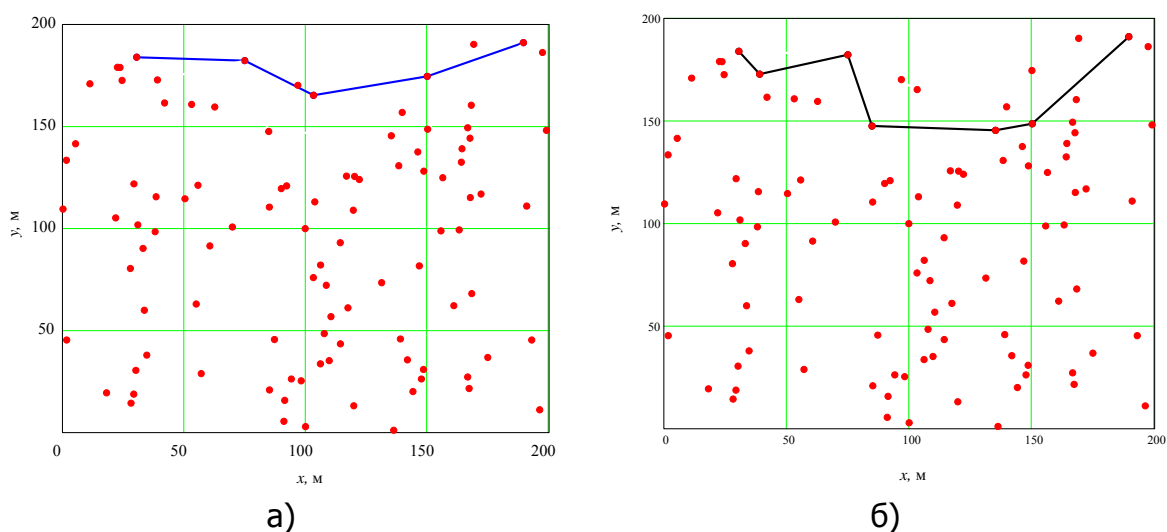


Рис. 3. Пример результатов имитационного моделирования при СКО ошибки позиционирования равной 20 м (*а* – кратчайший маршрут с тремя транзитными узлами, *б* – выбранный маршрут с пятью транзитными узлами)

Помимо увеличения длины выбираемого маршрута по сравнению с кратчайшим, выбираемый маршрут может оказаться несуществующим. Это происходит в тех случаях, когда в выбранном маршруте имеются участки, на которых реальные расстояния между узлами превышают радиус связи  $R$ . К этому приводят ошибки оценки координат, в результате которых возникают ошибки оценки расстояния между узлами. В таких случаях появляются неработоспособные маршруты, которые требуется перестраивать, т. е. сеть должна вновь производить работу по определению (уточнению координат) и выбору кратчайших маршрутов. В табл. 1 приведены данные, полученные в результате имитационного моделирования.

Таблица 1.

Результаты имитационного моделирования ошибок маршрутизации

Величина относительной ошибки позиционирования, %	Величина абсолютной ошибки позиционирования, м	Оценка вероятности ошибочной маршрутизации
0,2	0,1	0,00
1	0,5	0,03
2	1	0,09
4	2	0,09
6	3	0,17
8	4	0,21
10	5	0,29
12	6	0,38
14	7	0,37
16	8	0,44
18	9	0,47
20	10	0,59
30	15	0,67
50	25	0,85
70	35	0,91
100	50	0,95

На рис. 4 приведена зависимость вероятности выбора ошибочного (неработоспособного) маршрута от величины относительной ошибки позиционирования  $\delta$ , полученная в результате имитационного моделирования.

В данном случае  $\delta = 100 \frac{\sigma}{R} \%$ , где  $\sigma$  – среднеквадратическое отклонение ошибки позиционирования (м),  $R$  – радиус связи узла сети (м).

Как видно из приведенной зависимости, вероятность ошибочного построения маршрута при ошибке позиционирования 20 % близка к 0,5.

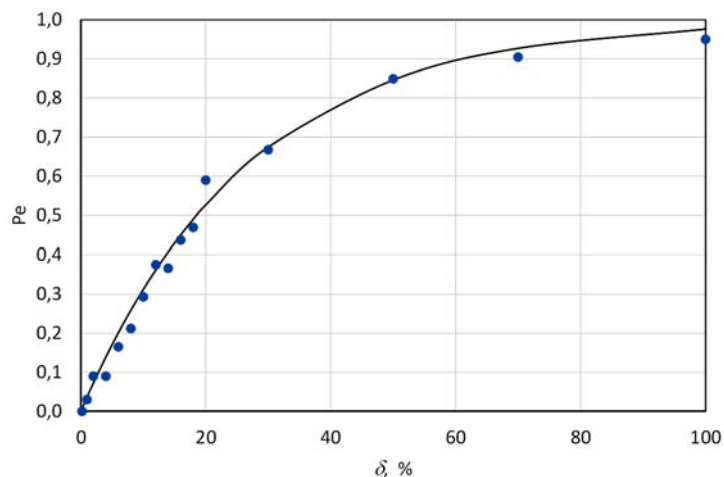


Рис. 4. Зависимость вероятности ошибочного выбора маршрута от относительной ошибки позиционирования узлов сети

Из данной зависимости можно сделать вывод об области допустимых значений ошибки позиционирования. Очевидно, что в практических задачах вероятность выбора ошибочного маршрута должна, по крайней мере, не превосходить 0,5, в этом случае ошибка позиционирования должна быть не более 20 % от радиуса связи узла сети.

Для снижения вероятности таких ситуаций может быть целесообразно производить поиск нескольких альтернативных маршрутов, используя, например, алгоритм Йена или иной алгоритм поиска  $k$  – кратчайших маршрутов. Однако, такие алгоритмы требуют значительных вычислительных ресурсов.

Естественно, что ошибочный выбор маршрута крайне нежелателен, поскольку влечет за собой повторение работы по поиску маршрутов, к тому же нет гарантии, что в результате этого поиска вновь не будет произведен ошибочный выбор.

На рис. 5 приведена модель фрагмента (участка) маршрута с учетом ошибок позиционирования узлов.

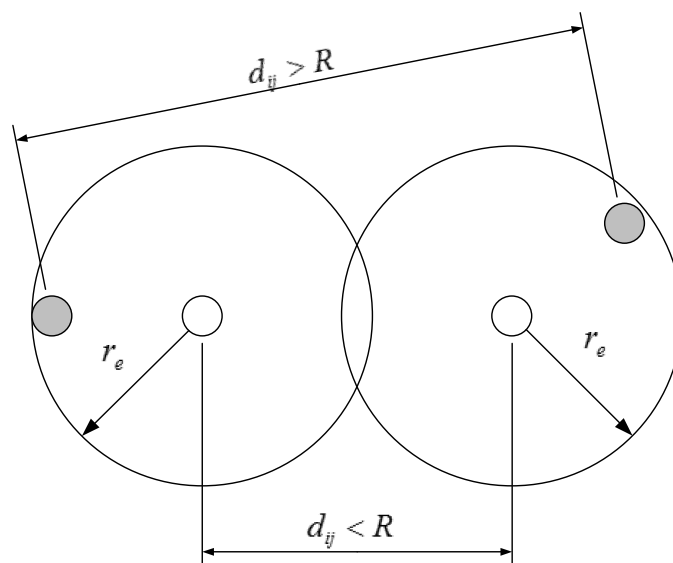


Рис. 5. Модель фрагмента маршрута с учетом ошибок позиционирования узлов

Узлы сети  $n_i$  и  $n_j$  находятся в своих ожидаемых позициях, которые определены с некоторой ошибкой  $r_e$ . Ошибка позиционирования обозначена кругом радиуса  $r_e$ , расстояние между ожидаемыми позициями узлов  $n_i$  и  $n_j$  равно  $d_{ij}$ . Полагаем что это расстояние меньше радиуса связи  $d_{ij} < R$ . Также допустим, что  $d_{ij} + 2r_e > R$ .

Если истинное местоположение каждого из узлов может находиться в любой точке круга с радиусом  $r_e$ , то очевидно, что при данном допущении имеет место отличная от нуля вероятность того, что расстояние между истинными местоположениями узлов будет превышать величину  $R$ .

Очевидно, что возможным решением данной проблемы является отказ от использования в маршруте участков, для которых выполняется условие  $d_{ij} + 2r_e > R$ . Для достижения этого предлагаются два возможных способа:

- перед решением задачи выбора маршрута заменить величину  $R$  на величину  $R - 2r_e$ ;
- после решения задачи маршрутизации изменить радиус связи узлов на величину  $R + 2r_e$ .

Первый и второй способы гарантируют, что расстояние между узлами сети не превысит величины  $d_{ij} + 2r_e$ , а значит связность между узлами не нарушится.

Следует ожидать, что реализация как первого, так и второго способов приведет к изменению структурных параметров сети и изменению, связанного с этим, энергопотребления. Занижение радиуса связи узла на величину удвоенной ошибки позиционирования при поиске кратчайших маршрутов приведет к увеличению количества транзитов в маршруте, и, следовательно, к увеличению затрат энергии при передаче данных по маршруту. Увеличение радиуса связи узлов сопряжено с увеличением мощности передатчиков или использованием дополнительных средств, обеспечивающих повышение дальности связи (направленные антенны).

Далее проведем анализ зависимости длин кратчайших маршрутов и количества транзитных участков в них от величины ошибки позиционирования узлов сети.

## 2 Эффективность маршрутизации в беспроводной сенсорной сети

Одной из целей позиционирования узлов БСС является получение информации о структуре сети. Эта информация может быть использована для решения задач построения и эксплуатации БСС. Информация о координатах узлов сети, наряду с данными о параметрах приемопередатчиков и об условиях распространения сигнала, позволяет определить позиции размещения новых узлов для расширения или восстановления сети, а также использовать различные протоколы маршрутизации трафика, использующие данные о физических координатах узлов (MECN, SMECN, GAF, GEAR, Span, TBF, BVGF, GeRaF). Эти протоколы, при выборе маршрутов пропуска трафика между узлами сети следуют правилу минимизации длины маршрута, вычисленной как сумма расстояний между узлами маршрута. Если процедура вычисления длины маршрута допускает некоторую ошибку  $\varepsilon$  (например, обусловленную ошибками исходных данных о координатах



узлов), то результатом поиска кратчайшего маршрута, в общем случае, может быть маршрут, отличный от кратчайшего. Тогда можно говорить о качестве решения задачи маршрутизации, которое можно охарактеризовать тем, насколько длина выбранного маршрута близка к длине наикратчайшего маршрута. Эта мера, фактически, характеризует эффективность маршрутизации как совокупности задач определения структуры сети и выбора маршрута в ней. Выше было отмечено, что в результате маршрутизации может быть выбран несуществующий (ошибочный) маршрут. Отметим, что в данном случае мы рассматриваем только существующие маршруты.

Представим ситуацию, когда имеются два маршрута  $P_1$  и  $P_2$  с истинными длинами  $L_1$  и  $L_2$ , соответственно, причем  $L_1 < L_2$ . При этом длина первого маршрута определяется с абсолютной ошибкой  $\varepsilon_1$ , а второго  $\varepsilon_2$ . Допустим, что с учетом ошибок имеет место  $L_1 + \varepsilon_1 > L_2 + \varepsilon_2$ , т. е. из-за ошибок оценки длины, будет выбран маршрут имеющий большую длину. Величина  $e = \frac{L_1}{L_2}$  характеризует близость полученного решения к оптимальному решению (выбору кратчайшего маршрута). Фактически, эта величина характеризует эффективность маршрутизации, ее максимальное значение равно единице, что соответствует выбору кратчайшего маршрута, значение меньшее единицы говорит об отличии выбираемого маршрута от оптимального. Очевидно, что величина  $e$  зависит от величин ошибок  $\varepsilon_1$  и  $\varepsilon_2$ , уменьшение этих величин приводит к увеличению  $e$ , т. е. к увеличению эффективности маршрутизации.

В общем виде можно записать как

$$e = \frac{L_{\min}}{L_c}, \quad (1)$$

где  $L_{\min}$  – длина кратчайшего маршрута,  $L_c$  – длина выбранного маршрута.

Если сделать допущение, что  $\varepsilon_1 = \varepsilon_2 = \varepsilon$ , то минимальная величина  $e$  составит:

$$e_{\min} = \frac{L_{\min}}{L_{\min} + 2\varepsilon}. \quad (2)$$

Задачу повышения эффективности маршрутизации можно рассматривать, как задачу снижения ошибки определения длины маршрута, которая в свою очередь, зависит от ошибок позиционирования узлов сети.

Если сделать допущение, что ошибки определения длин участков маршрута случайны и независимы, а ошибка определения длины  $i$ -го участка маршрута характеризуется среднеквадратическим отклонением, которое равно  $\sigma_i$ , то среднеквадратическое отклонение для длины маршрута:

$$\sigma = \sqrt{\sum_{i=1}^k \sigma_i^2}, \quad (3)$$

где  $k$  – число участков маршрута.

Выражение (1) может быть вычислено с учетом (3), например, с использованием правила  $2\sigma$ , т. е.  $\varepsilon = 2\sigma$ .

В табл. 2 приведены результаты имитационного моделирования, с использованием описанной выше модели.

Таблица 2.

Результаты имитационного моделирования оценки эффективности маршрутизации

Величина относительной ошибки позиционирования, %	Величина абсолютной ошибки позиционирования, м	Средняя длина кратчайшего пути с учетом ошибки позиционирования, м	Оценка эффективности маршрутизации
2	1	101,98	1,00
10	5	103,42	1,00
20	10	105,82	0,97
30	15	113,99	0,95
40	20	114,40	0,92
50	25	119,30	0,88

На рис. 6 приведена зависимость (1), полученная методом имитационного моделирования, с использованием описанной выше модели.

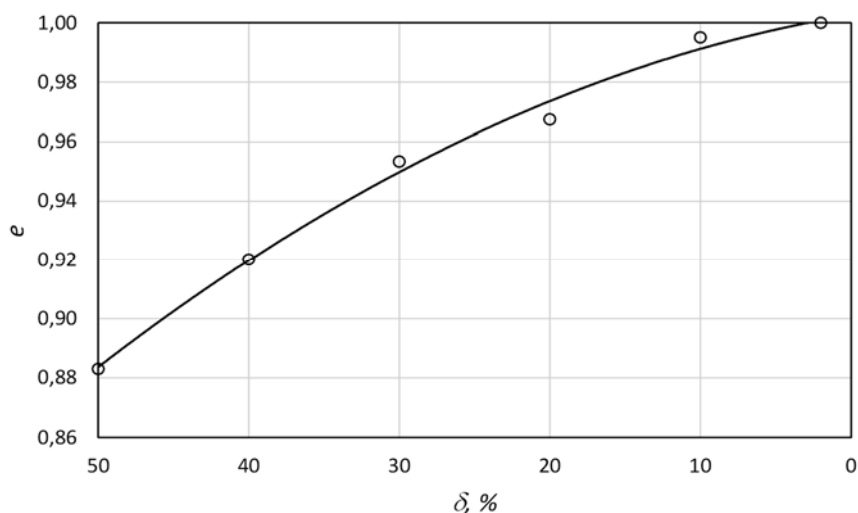


Рис. 6. Зависимость эффективности маршрутизации от величины относительной ошибки позиционирования

Как видно из приведенной зависимости эффективность маршрутизации увеличивается с уменьшением величины ошибки определения координат узлов сети.

Таким образом, эффективность, т. е. качество решения задачи маршрутизации при использовании алгоритмов, основанных на поиске маршрута минимальной длины, зависит от величины ошибки определения координат сети. Результаты имитационного моделирования для типовых параметров сети показали, что эффективность решения задачи маршрутизации изменяется более, чем

на 20% при уменьшении среднеквадратического отклонения ошибки определения координат на 35 м, т. е. на 70 % радиуса связи узла.

### 3 Эффективность расходования электроэнергии в беспроводной сенсорной сети

Как было показано выше, ошибка позиционирования приводит к увеличению длины выбираемого маршрута по отношению к оптимальному (кратчайшему) маршруту. Аналогично длине маршрута его можно охарактеризовать числом транзитов. При этом увеличение длины также приводит и к увеличению числа транзитов в маршруте. Каждый транзитный участок маршрута предполагает наличие узла, который выполняет функцию транзита трафика. Естественно, что каждый из транзитных узлов расходует энергию своего источника питания. Если сделать допущение от том, что каждый транзитный узел расходует для передачи единицы данных (пакета) энергию  $E_0$ , то энергия необходимая для передачи пакета по маршруту будет равна:

$$E = kE_0, \quad (4)$$

где  $k$  – число транзитных узлов.

Тогда эффективность расхода энергии с учетом функций маршрутизации трафика можно определить, как

$$e = \frac{E_{\min}}{E_C}, \quad (5)$$

где  $E_{\min}$  – расход энергии при передаче по кратчайшему маршруту,

$E_C$  – расход энергии при передаче по выбранному маршруту.

В табл. 3 приведены результаты оценки эффективности затрат энергии, полученные с помощью имитационного моделирования с использованием описанной выше модели.

Таблица 3.

Результаты имитационного моделирования оценки эффективности затрат энергии

Величина относительной ошибки позиционирования, %	Величина абсолютной ошибки позиционирования, м	Оценка эффективности затрат энергии
2	1	1,00
10	5	0,96
20	10	1,01
30	15	0,94
40	20	0,91
50	25	0,86

На рис. 7 приведена полученная зависимость. Параметры моделирования следующие: узлы БСС размещаются в области, представляющей собой квадрат

200x200 м. Сеть содержит 100 узлов, которые размещены случайным образом в области обслуживания. Зона связи узла описывается кругом с радиусом связи узла 50 м. В сети производится поиск всех кратчайших маршрутов и вычисляется среднее количество транзитов в маршруте. Затем к координатам узлов сети суммируется случайная ошибка, имеющая нормальное распределение со средним значением 0. После этого вновь вычисляется среднее количество транзитов в маршруте. Эффективность расхода энергии вычисляется в соответствии с (5).

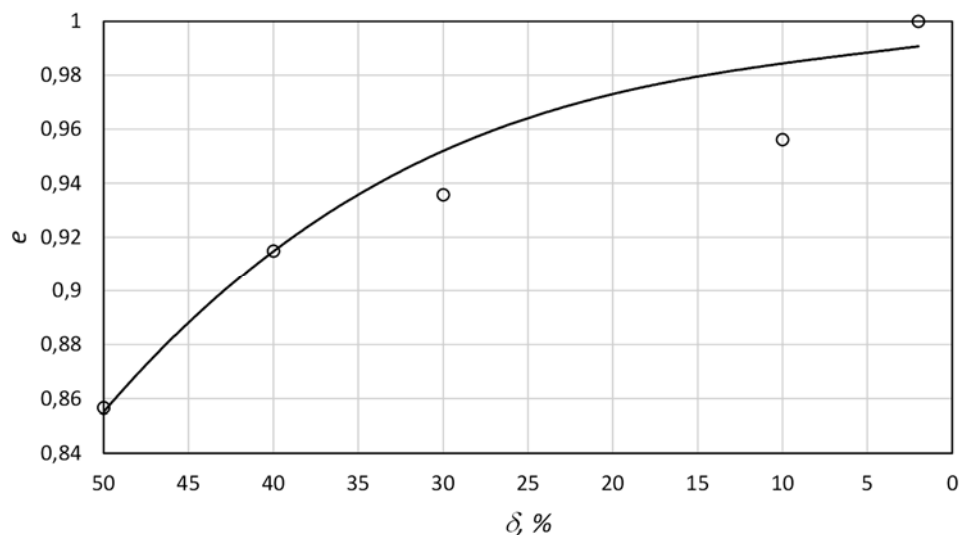


Рис. 7. Зависимость эффективности затрат энергии от величины относительной ошибки позиционирования

Как видно из приведенной зависимости, эффективность расхода энергии увеличивается с уменьшением величины ошибки определения координат узлов сети. Таким образом, эффективность расхода энергии при использовании алгоритмов, основанных на поиске маршрута минимальной длины, зависит от величины ошибки определения координат сети. Результаты имитационного моделирования для типовых параметров сети показали, что эффективность расхода энергии изменяется на величину около 20 % при уменьшении среднеквадратического отклонения ошибки определения координат на 50 % радиуса связи узла.

Из сравнительного анализа результатов имитационного моделирования для длины маршрута видно, что как эффективность маршрутизации, так и эффективность расхода энергии имеют схожие зависимости от величины ошибки позиционирования узлов сети. Снижение ошибки позиционирования приводит к увеличению эффективности маршрутизации, что, в свою очередь, проявляется не только в приближении длины выбираемого маршрута к оптимальной, но и в уменьшении числа транзитных узлов в маршруте, что приводит к снижению расхода энергии при передаче пакета по выбранному маршруту.

#### 4 Эффективность решения задач позиционирования узлов связи в БСС

Как было показано выше, решение задач позиционирования в БСС предполагает наличие некоторой исходной информации, на основе которой с использованием различных методов может быть произведено позиционирование узлов

БСС. Как правило, такой информацией является информация о локализации некоторого числа узлов сети, которые рассматриваются как опорные. При решении задач мультilaterации величина ошибки определения местоположения узла зависит от числа опорных узлов, как было показано выше, с ростом их числа она уменьшается. Если в качестве опорных узлов используются узлы, оснащенные автономными средствами позиционирования (глобальных навигационных систем GPS, ГЛОНАС или иными средствами навигации), то как правило, их стоимость выше, чем стоимость остальных узлов, а также существенно выше расход электроэнергии, необходимой для работы приемника системы позиционирования. В связи с этим при проектировании и эксплуатации БСС стремятся сократить число таких сетевых элементов до минимально допустимого числа, которое определяется конкретной структурой сети и требованиями к точности позиционирования остальных узлов.

На основе данных, полученных при моделировании мультilaterации, были получены функции распределения ошибки и зависимость ошибки позиционирования от количества опорных узлов. Таким образом, можно построить зависимость, характеризующую зависимость эффективности маршрутизации от числа используемых в задаче мультilaterации опорных узлов (рис. 8 и табл. 4).



Рис. 8. Зависимость эффективности маршрутизации от числа опорных узлов

Как видно из полученной зависимости, эффективность маршрутизации возрастает с ростом числа опорных узлов. Данный результат свидетельствует о том, что с увеличением числа опорных узлов возрастает точность позиционирования, что в свою очередь, приводит к снижению ошибки при выборе маршрута. В данной трактовке понятие эффективности относится к решению задачи маршрутизации.

Понятие эффективности можно применить и для характеристики использования опорных узлов в задачах позиционирования (в целях решения задачи маршрутизации).

Таблица 4.

Результаты имитационного моделирования оценки эффективности маршрутизации

Число опорных узлов, шт.	Абсолютная ошибка позиционирования, м	Оценка эффективности маршрутизации
3	6,4	0,930
4	4,7	0,933
5	5,7	0,934
6	5,6	0,936
7	4,5	0,937
8	3,7	0,938
9	3,9	0,939
10	3,8	0,940

Опишем эффективность использования опорных узлов как изменение эффективности маршрутизации от изменения числа опорных узлов:

$$e_0 = \frac{\Delta e}{\Delta k}, \quad (6)$$

где  $\Delta e$  – изменение эффективности маршрутизации,  
 $\Delta k$  – изменение числа опорных узлов.

Оценка (6), полученная по результатам имитационного моделирования приведена на рис. 9 и в табл. 5.

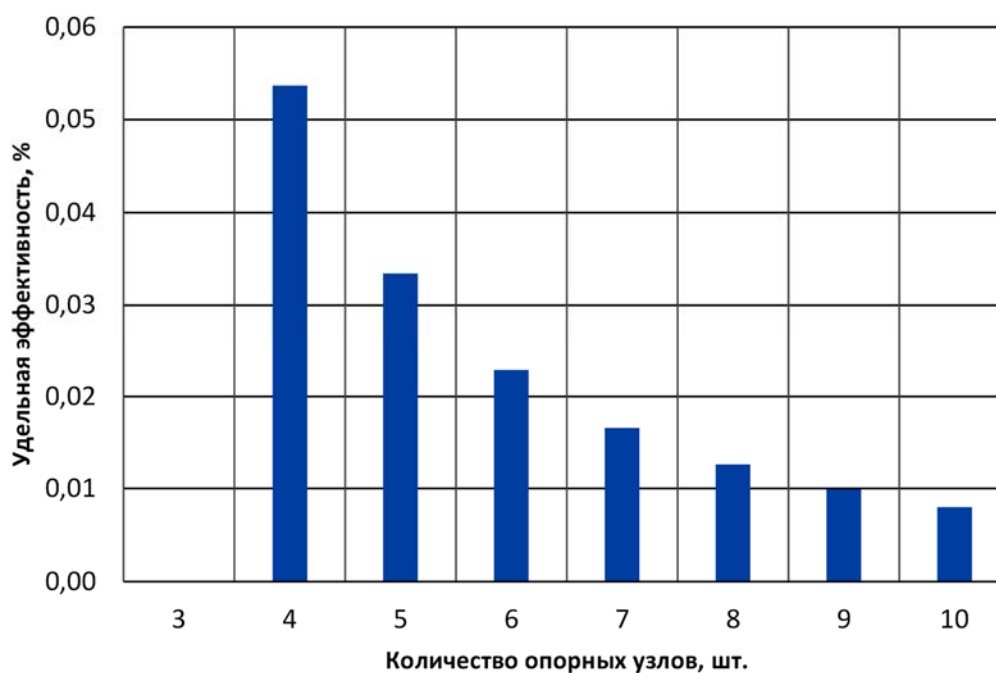


Рис. 9. Зависимость удельной эффективности использования опорных узлов от их числа

Таблица 5.

Результаты имитационного моделирования  
оценки эффективности использования опорных узлов

Количество опорных узлов, шт.	Абсолютная ошибка позиционирования, м	Оценка эффективности использования опорных узлов
3	6,4	0,000
4	4,7	0,054
5	5,7	0,033
6	5,6	0,023
7	4,5	0,017
8	3,7	0,013
9	3,9	0,010
10	3,8	0,008

Как видно из полученной зависимости, наибольшая эффективность в смысле решения задачи маршрутизации имеет место при относительно малом числе опорных узлов. При увеличении числа опорных узлов эффективность их введения снижается. Таким образом, для решения задач построения и функционирования БСС выбор числа опорных узлов следует производить из соображений минимальной достаточности.

### Выводы

Анализ влияния ошибки позиционирования узлов БСС на решение задачи выбора кратчайших маршрутов в БСС, показал существенную зависимость качества решения от величины ошибки (точности) позиционирования.

Увеличение ошибки позиционирования узлов БСС приводит к росту вероятности выбора ошибочного (несуществующего) маршрута, что, в свою очередь, приводит к необходимости уточнения координат и повторному решению задачи выбора маршрутов. Это приводит к росту непроизводительной нагрузки на сеть связи и непроизводительному расходу энергии источников питания узлов сети. Результаты имитационного моделирования для типовых параметров БСС показали, что в большинстве практических случаев допустимая вероятность выбора ошибочного маршрута обеспечивается при относительной величине ошибки позиционирования узлов сети не более 20 %.

Ошибки позиционирования также приводят к возможности выбора маршрута, длина которого отличается от длины кратчайшего маршрута, что снижает эффективность решения задачи маршрутизации. Эффективность маршрутизации, характеризуемая близостью к оптимальному решению, тем выше, чем меньше ошибка позиционирования узлов БСС.

Наряду с отличием длин выбираемых маршрутов от оптимальных, ошибка позиционирования приводит к тому, что число транзитных узлов в маршрутах также отличается от их числа в кратчайших маршрутах. Это потенциально, приводит как к снижению качества обслуживания трафика, так и к росту расхода энергии БСС.

С помощью имитационного моделирования было показано, что увеличение числа опорных узлов в БСС приводит к уменьшению ошибки позиционирования, и, как следствие, к повышению эффективности качества решения задачи маршрутизации. Относительное увеличение эффективности решения задачи маршрутизации снижается с увеличением числа опорных узлов. Поэтому в практических задачах, при выборе числа опорных узлов следует исходить из принципа минимальной достаточности.

Полученные результаты анализа влияния ошибки позиционирования на эффективность решения задач маршрутизации показали, что для полноценного использования сетевых ресурсов, планирования и обеспечения функционирования БСС требуется иметь достаточно достоверные данные о взаимном расположении узлов сети. Повышение точности позиционирования узлов БСС обеспечивает увеличение эффективности управления сетью и рациональное использование ее ресурсов.

### Литература

1. Бузюков Л. Б., Окунева Д. В., Парамонов А. И. Проблемы построения беспроводных сенсорных сетей // Труды учебных заведений связи. 2017. Т. 3. № 1. С. 5–12.
2. Чинь Б. Х., Парамонов А. И. Исследование параметров маршрутов в самоорганизующихся сетях связи // Информационные технологии и телекоммуникации. 2016. Т. 4. № 4. С. 81–88.
3. Хундонугбо Э. Ф., Парамонов А. И. Анализ методов позиционирования узлов беспроводной самоорганизующейся сети // Труды учебных заведений связи. 2016. Т. 2. № 1. С. 99–103.
4. Хундонугбо Э. Ф., Гришин И. В., Шепин А. В. Определение координат узлов беспроводной сенсорной сети с помощью беспилотного летательного аппарата // Электросвязь. 2017. № 11. С. 57–61.
5. Хундонугбо Э. Ф., Гришин И. В., Окунева Д. В. Метод определения пространственных координат в беспроводных сенсорных сетях // Электросвязь. 2018. № 9. С. 27–31.
6. Хундонугбо Э. Ф., Парамонов А. И. Зависимость точности позиционирования узлов БСС от точности исходных данных // 71-я Всероссийская научно-техническая конференция, посвященная дню радио. 2016. С. 185–187.
7. Хундонугбо Э. Ф., Парамонов А. И., Кучерявый А. Е. Анализ методов позиционирования узлов беспроводной самоорганизующейся сети // Труды Научно-исследовательского института радио. 2016. № 4. С. 2–7.
8. Хундонугбо Э. Ф., Киричек Р. В., Гришин И. В., Думин Д. И. Позиционирование элементов сенсорной сети с использованием беспилотных летательных аппаратов // Информационные технологии и телекоммуникации. 2016. Т. 4. № 2. С. 26–32.
9. Houndonougbo, F., Hoang, T., Kirichek, R., Paramonov, A., Koucheryavy, A. Adaptive Routing in Wireless Sensor Networks Under Electromagnetic Interference // 31st International Conference on Information Networking (ICOIN). 2017. pp. 76–79.
10. Хундонугбо Э. Ф., Парамонов А. И. Размещение узлов в сети и эффект размещения опорных узлов // 72-я Всероссийская научно-техническая конференция, посвященная Дню радио. 2017. С. 199–200.
11. Хундонугбо Э. Ф., Гришин И. В., Парамонов А. И. Алгоритм позиционирования сенсорных узлов с применением летательного аппарата // 73-я Всероссийская научно-техническая конференция, посвященная Дню радио. 2018. С. 241–243.
12. Кристофидес, Н. Теория графов. Алгоритмический подход. М.: Мир. 1978. 430 с.

### References

1. Buzyukov, L., Okuneva, D., Paramonov, A. Problems of Building Wireless Sensor Networks // Proceedings of Telecommunication Universities. 2017. Vol. 3. No 1. pp. 5–12.
2. Trinh, B., Paramonov, A. Research of Parameters of Routes in Self-Organizing Networks // Telecom IT. 2016. Vol. 4. Iss 4. pp. 81–88. (in Russian).



3. Houndonougbo, E., Paramonov, A. Analysis of Methods of Node Position in an Ad-Hoc Network // Proceedings of Telecommunication Universities. 2016. Vol. 2. No. 1. pp. 99–103.
4. Houndonougbo, E., Grishin, I., Shepin, A., A Node Positioning Algorithm in Wireless Sensor Networks by Means of Unmanned Serial Vehicle//Elektrosvyaz'. 2017. No. 11. pp. 57–61.
5. Houndonougbo, E., Grishin, I., Okuneva, D. Method of Determining of Local Coordinates in Wireless Sensor Networks // Elektrosvyaz'. 2018. No. 9. pp. 27–31.
6. Houndonougbo, E., Paramonov, A. The Dependence of the Accuracy of the Positioning of Nodes WSN on the Accuracy of the Source Data // 71st All-Russian Scientific-Technical Conference, Dedicated to the Day of Radio. 2016. pp. 185–187.
7. Houndonougbo, E., Paramonov, A., Koucheryavy, A. Analysis of Methods of Node Position in an Ad-Hoc Network // Trudy NIIR. 2016. No. 4. pp. 2–7.
8. Houndonougbo, E., Kirichek, R., Grishin, I., Dumin, D. Method of Positioning Elements of a Sensor Network Using Unmanned Aerial Vehicles // Telecom IT. 2016. Vol. 4. Iss. 2. pp. 26–32.
9. Houndonougbo, F., Hoang, T., Kirichek, R., Paramonov, A., Koucheryavy, A. Adaptive Routing in Wireless Sensor Networks Under Electromagnetic Interference // 31st International Conference on Information Networking (ICOIN). 2017. pp. 76–79.
10. Houndonougbo, E., Paramonov, A. The Placement of Nodes in the Network and the Effect of the Placement of Reference Nodes // 72nd All-Russian Scientific-Technical Conference, Dedicated to the Day of Radio. 2017. pp. 199–200.
11. Houndonougbo, E., Grishin, I., Paramonov, A. Algorithm for Positioning Sensory Nodes Using an UAV // 73rd All-Russian Scientific-Technical Conference, Dedicated to the Day of Radio. 2018. pp. 241–243.
12. Christofides, N. Graph Theory: An Algorithmic Approach. Academic Press, 1975. 400 p.

***Элизе Франк Хундонугбо***

– аспирант, СПбГУТ, Санкт-Петербург, 193232,  
Российская Федерация, franckyrusse@mail.ru

***Гришин Илья Владимирович***

– кандидат технических наук, доцент,  
СПбГУТ, Санкт-Петербург, 193232,  
Российская Федерация, i.v.grischin@gmail.com

***Парамонов Александр Иванович***

– доктор технических наук, профессор, СПбГУТ,  
Санкт-Петербург, 193232, Российская Федерация,  
alex-in-spb@yandex.ru

***Houndonougbo Elise Franck***

– Postgraduate, SPbSUT, St. Petersburg,  
193232, Russian Federation, franckyrusse@mail.ru

***Grishin Ilija***

– Candidate of Engineering Sciences,  
Associate Professor, SPbSUT,  
St. Petersburg, 193232, Russian Federation,  
i.v.grischin@gmail.com

***Paramonov Alexander***

– Doctor of Engineering Sciences, Full Professor,  
SPbSUT, St. Petersburg, 193232, Russian Federation,  
alex-in-spb@yandex.ru